

TMT計画 進捗報告

臼田知史

青木和光, 伊王野大介, 山下卓也, 杉本正宏, 鈴木竜二, 嘉数悠子, 藤縄俊之,
能丸淳一, 関口和寛, 吉田道利, 常田佐久 他 (国立天文台),
Henry Yang, Edward Stone, Robert Kirshner, Fengchuan Liu, Suijian Xue,
Eswar Reddy, Luc Simard, Tom Soifer 他 (TMT国際天文台)

Outline

- TMT計画の概要
- 現状：米国NSF参加に向けた動き & ハワイの現状
- 国内の活動



30m光学赤外線望遠鏡(TMT)計画の概要



日本、米国、カナダ、インド、中国の国際共同科学事業として、ハワイ島マウナケア山頂に口径30m光学赤外線望遠鏡TMTを建設する。 **2033年度***の完成を目指し、日本は望遠鏡本体や主鏡の製作などを担当する。従来の地上大型望遠鏡に対し、**10倍以上の集光力、3倍以上の解像度**、星のような点光源に対しては**100倍以上の感度向上**を達成する。

*) TMT国際天文台が現在検討している完成年度。フロンティア事業の計画上は2027年度。

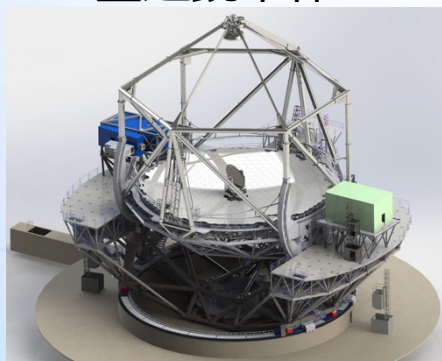
主要科学目標

- 1) 地球型系外惑星の直接検出と生命の兆候探査
- 2) 宇宙最初の天体の解明
- 3) ダークエネルギーの性質の解明
- 4) マルチメッセンジャー天文学の発展

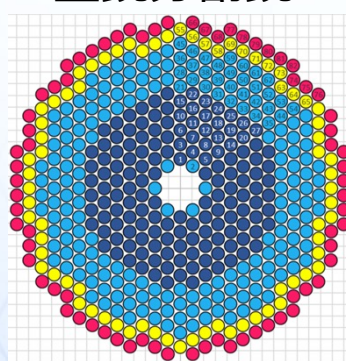
- メンバー国・機関：自然科学研究機構(日本)、カリフォルニア工科大学、カリフォルニア大学、中国国家天文台、インド科学技術庁、カナダ国立研究機構、(NSF(米国国立科学財団)の参加プロセス進行中)
- 日本の分担：望遠鏡本体構造、主鏡、観測装置
- 日本の建設費：375億円+国内経費40億円

日本が製作を担当する部位

望遠鏡本体



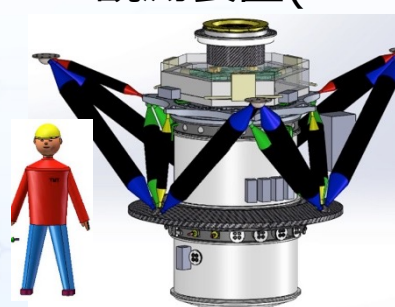
主鏡分割鏡



研磨加工分担

- 日本
- 米国
- インド
- 中国

観測装置(IRIS)



低次波面センサー
(カナダ)

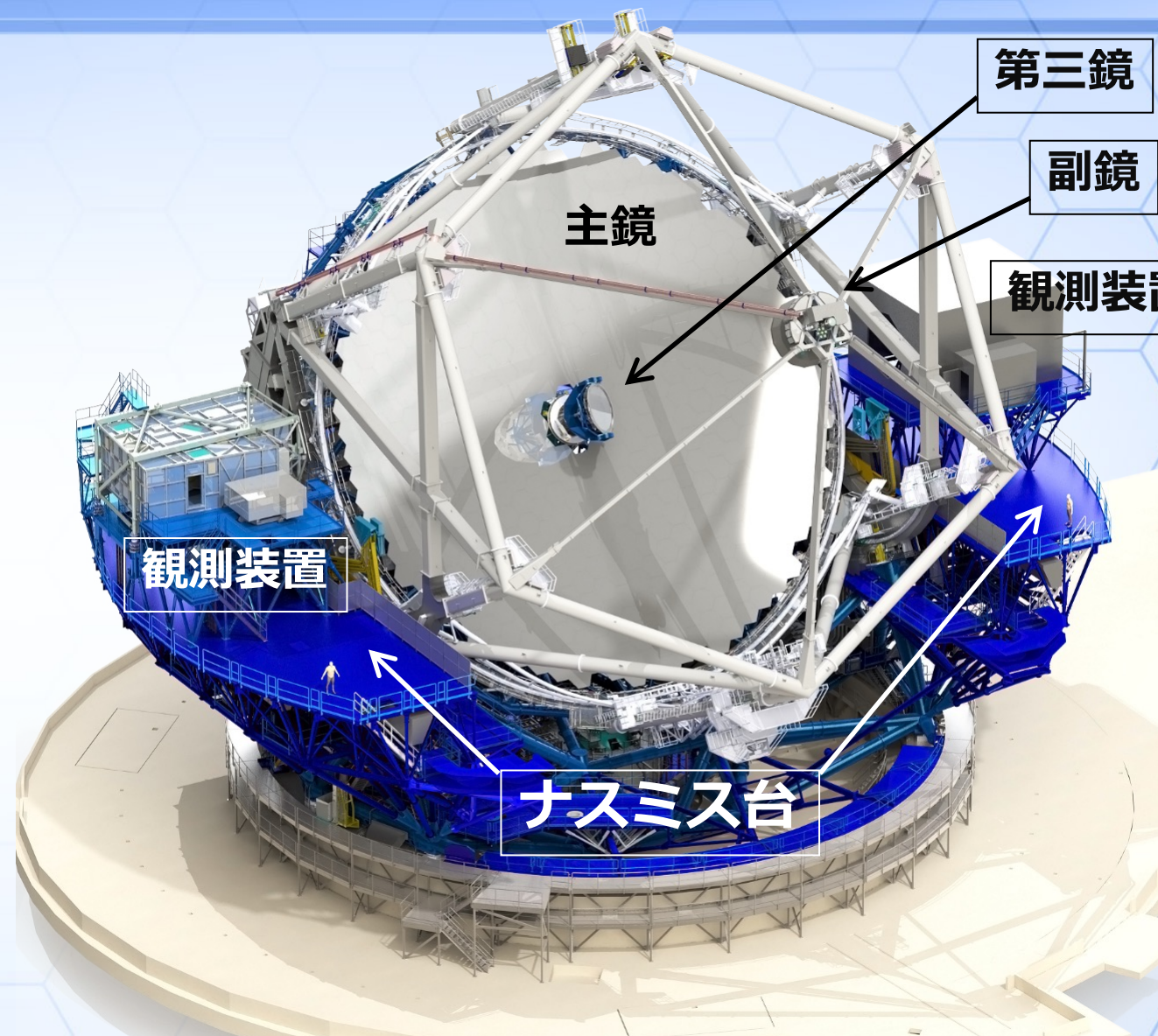
撮像モード
(日本)

面分光モード
(米国)



望遠鏡本体概要

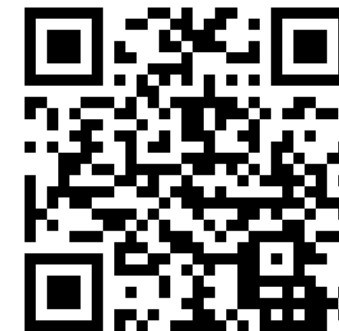
- リッチークレッチェン光学系
- 主鏡：30m f/1 (双曲凹面)
1.44m x 492枚 (82枚交換用)
- 副鏡：3.1m (双曲凸面)
(将来AO副鏡によるGLAO)
- 第三鏡：2.5m x 3.5m (平面)
- f/15 (ナスミス焦点)
- 視野：15分角 (1.9 m Φ)
- 波長：0.31~28 μ m
- レーザーガイド星システム
- 回折限界：0.008秒角@1 μ m



TMT観測装置計画の概要

Overview of Instrument Capabilities

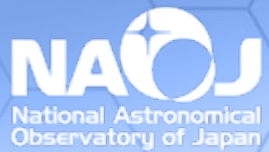
<https://www.tmt.org/page/instrument-overview>



Instrument	Timescale/ Status	Field of view/ slit length/ pixel scale	Spectral resolution	Wavelength range (μm)	Sensitivity
InfraRed Imager and Spectrometer (IRIS) [AO feed from NFIRAOS]	First light/ Final Design	IFU 0.45x0.51" @0.004"/pix to 2.25"x4.4" @0.050"/pix	4000-8000	0.84-2.4	$t_{\text{exp}}=900\text{s}$, S/N=10 per channel, H=25.8, K=24.2
		Imager 34"x34" @0.004"/pix	J, H, K+ narrow bands		$t_{\text{exp}}=3600\text{s}$, S/N=100 H=26.2, K=25.6
Wide Field Optical Spectrometer (WFOS)	First light/ Conceptual	25.5 (8.3x3) arcmin ² , >500" total slit length (~58 targets with 8" slits, 0.5" gaps), 0.05"/pixel	1500-3500 @0.75" slits	0.31-1.0 Full spectral coverage @R=1500	$t_{\text{exp}}=5 \times 900\text{s}$, S/N=150 per element, R=3500 V=20.5



30m光学赤外線望遠鏡(TMT)計画の概要

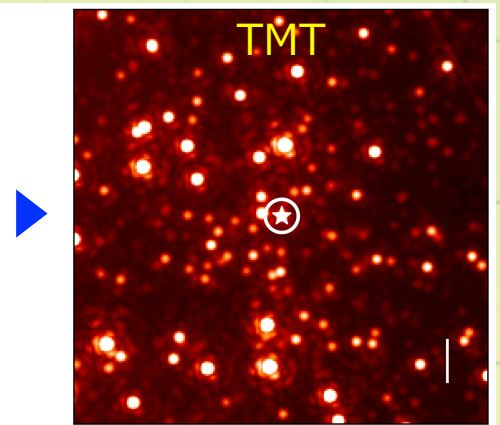
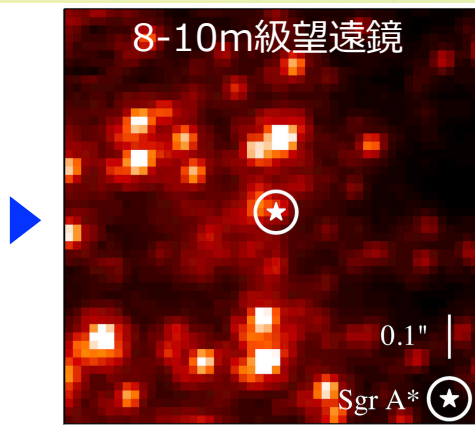
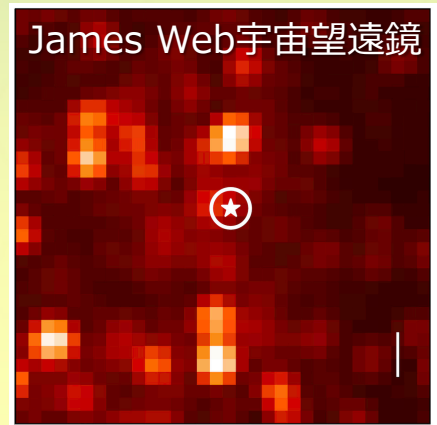


従来の望遠鏡の3倍以上の解像度、10倍以上の集光力、100倍以上の感度

解像度の向上

大口径と補償光学技術により
ハubble宇宙望遠鏡の10倍、
ジェームズウェッブ宇宙望遠鏡の5
倍、従来の地上望遠鏡の3倍以上の解
像度を實現

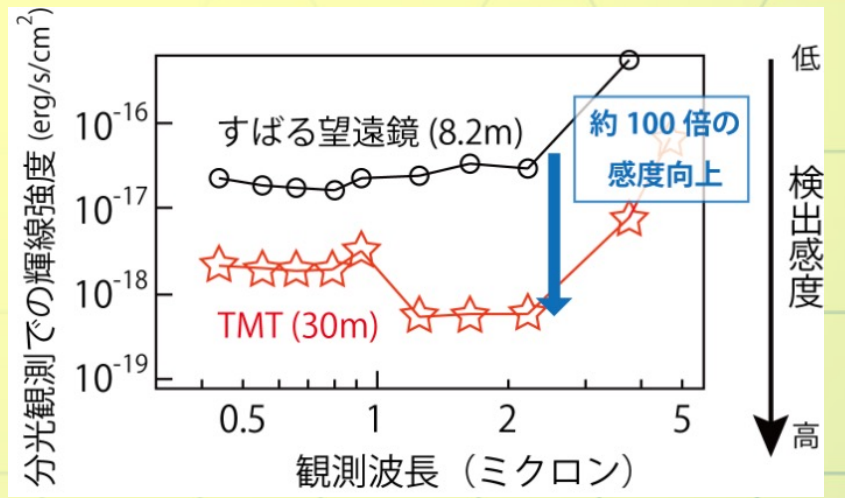
星が密集する銀河系中心
の撮像シミュレーション



視野約0.5秒角

感度の向上

解像度向上により背景光の影響が抑えられる。
星や惑星、最遠方銀河のような点光源の分光観測
の感度は従来の望遠鏡の100倍以上に達する。



解像度と感度の飛躍的向上で、これまで見えなかった宇宙を捉える



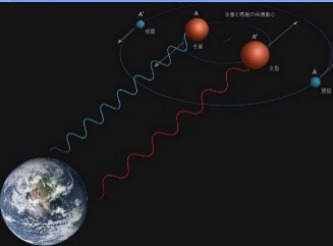
すばる2とTMTが明らかにする宇宙の姿



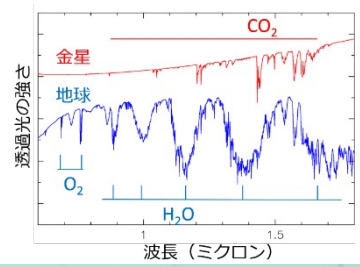
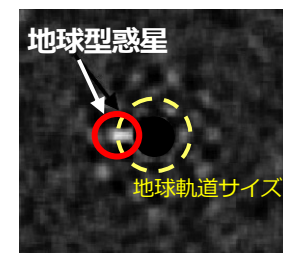
すばる2：超広視野探査

TMT：超高感度&高解像度

多様な地球型系外惑星候補天体を同定し、その特徴を調査

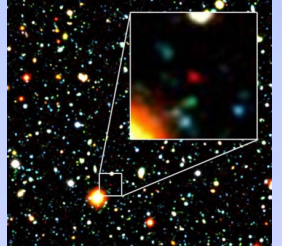


間接探査の手法で**地球型惑星をもつ天体**を検出

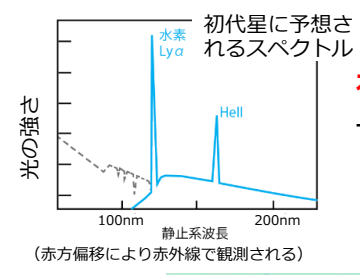
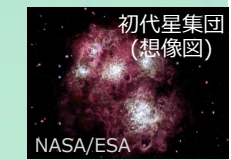


地球型系外惑星の直接検出惑星大気分光観測 → 生命の兆候探査

銀河の急成長期 (約100億年前) の物理過程の解明。HSC/PFS (可視光) で見えない、ULTIMATE (赤外線) による宇宙最初期の天体形成過程の調査。



広視野探査で**初代銀河候補**を検出

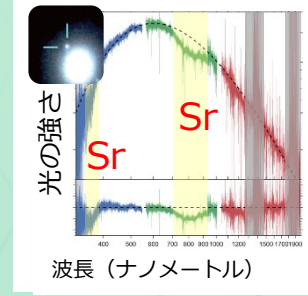


初代星からの光の直接検出 → 初代星の形成時期と性質の解明

多様な重力波源の追跡観測により、宇宙における元素合成の概要を把握。ニュートリノ源等の高エネルギー現象の原因天体を特定。

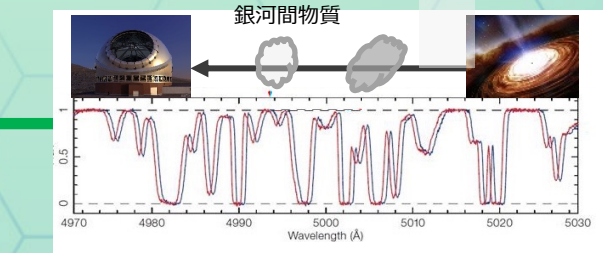
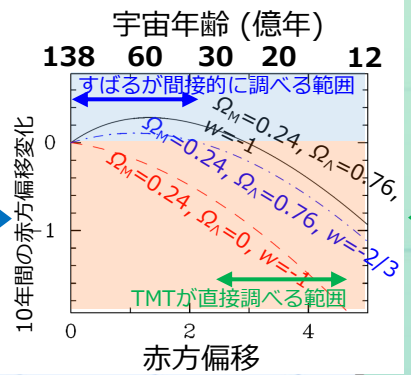


重力波・ニュートリノ検出後の**速やかな広視野探査の電磁波対応天体**を検出



電磁波対応天体の分光観測 → 爆発機構・宇宙における元素合成の詳細な解明

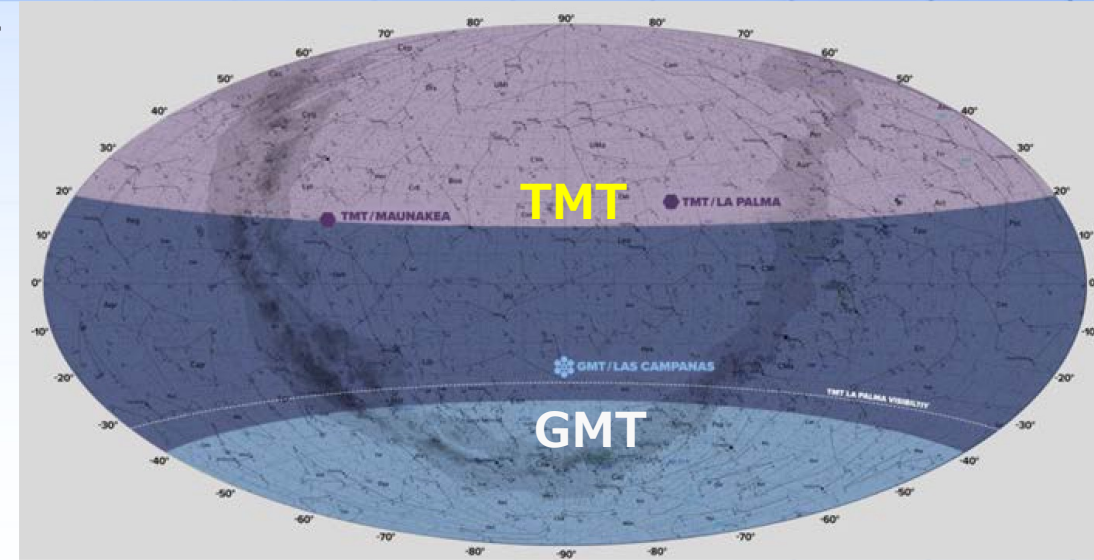
ダークマターの正体解明。ダークエネルギーの調査。ニュートリノ質量の決定。



宇宙の膨張の直接測定 → 全く新しい手法でのダークエネルギーの性質の解明

米国NSFの参加

- TMTの建設・運用に必要な予算を確保するためにはNSFの参加が欠かせない。
- 北半球のTMT、南半球のGMT合同のUS Extremely Large Telescope Programとして提案
- NSF MREFC提案 (2020年) → NSFでの審査・承認 → 予算案提出 → 米国議会での承認



※ MREFC: Major Research Equipment and Facilities Construction

NSF's National
Optical-Infrared Astronomy
Research Laboratory

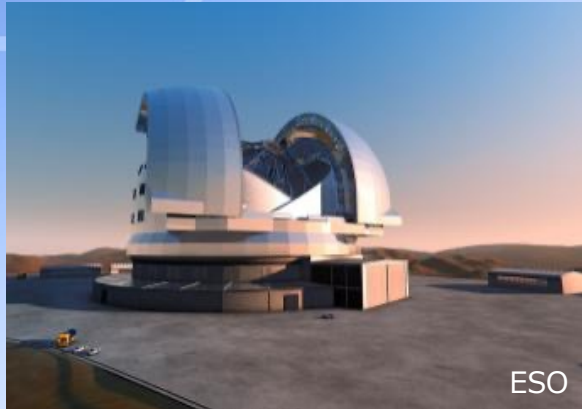


The US Extremely Large Telescope Program



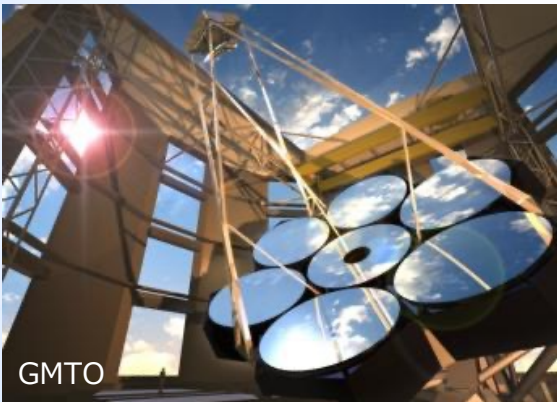
他の超大型望遠鏡の状況

ESO's ELT (ヨーロッパ超大型望遠鏡)



- 欧州南天天文台、ブラジル、チリ
- 口径39m、チリに建設中
- 主鏡分割鏡の製造開始(2020年末までに104枚の鏡材製造)、望遠鏡・ドーム・観測装置(一部)の最終設計段階

GMT (巨大マゼラン望遠鏡)

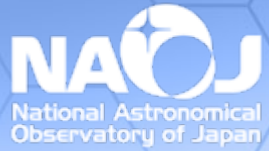


- 米国(カーネギー天文台、アリゾナ大ほか)、韓国、オーストラリア等
- 口径8.4mの鏡7枚 (24.5m相当)、チリに建設中
- 主鏡の製造中、望遠鏡・ドーム・観測装置(一部)の最終設計段階
- US-ELTプログラムとして、TMTおよびNOIRLabと協力し、データ解析・アーカイブ・運用体制等を共同で検討中

- TMTだけが北半球に建設され、**北の天空を観測**する。
- TMTは**完成時から**補償光学によって**回折限界の空間分解能を達成**する。



米国におけるTMT計画の予算承認プロセス

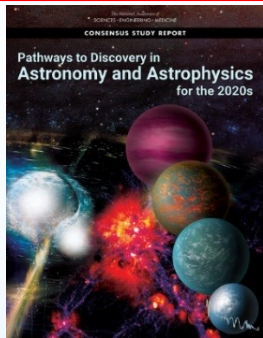


TMTの完成・運用にはNSFの正式参加・米国連邦予算の投入が不可欠である。これに向け、TMTとGMTをあわせた米国超大型望遠鏡プログラム (US-ELTプログラム) を提案しており、以下のとおり進んでいる。

① コミュニティでの検討と提案

- 科学検討・国際研究会
- Decadal Survey (Astro 2020)※への提案 (完了)
- パネルによる審査 (完了)
- Astro 2020公表 (2021年11月) (完了)

Decadal Survey (Astro 2020): NSFやNASAがスポンサーとなって米国科学アカデミーが実施する、米国研究者コミュニティによる将来計画の評価プロセス。



地上望遠鏡計画として、TMTとGMTを合わせた**US-ELTプログラム**が**最優先計画**として位置づけられた

② NSFによる審査

- US-ELTプログラムの一部として、TIOがNSF MREFC設計段階提案を提出 (完了)
- NSFはハワイ担当チームを結成し、ネイティブハワイアン等関係者との非公式な対話を実施 (完了)

【今後】

- NSFによる基本設計審査(PDR)、最終設計審査(FDR)
- 環境影響調査・国家歴史遺産保存法106条のプロセス (開始)
- NSF長官によるTMT計画参加の公式決定
- National Science Board (NSB)による承認

③ 連邦政府・議会での承認

現在の状況：

- 2022年7月：NSFが、環境影響調査等のプロセス開始
- NSF PDRは2022年11月開始。資料は提出済み10月1日

【今後】

- PDRに合格後、連邦行政管理予算局(OMB)がNSFと予算案を作成
- 連邦議会による審議・承認
- 米国連邦資金(MREFC予算)の投入

※ NSB: 学術界・産業界の代表者からなり、NSFの方針の決定や、大統領や議会に科学技術政策についての助言を行う。9

TMTを取り巻く状況の大幅改善

- ハワイやNSFに関するTMTの状況は劇的に改善
- ハワイ州でのマウナケア新管理組織設立、NSFの予算化プロセス開始により、動きが加速

2021年6月～

ハワイにおけるTIOの直接対話

- TMTプロジェクトのリーダーがハワイに異動し、傾聴と敬意に基づく直接対話と地元住民のニーズに沿った教育支援を軸に、先住民との信頼関係を醸成

➔ 先住民の草の根の声に明らかな変化

- (例) TMT反対の先住民長老 (2019年に道路封鎖で逮捕された1人) と、アクセス道路で談笑する関係まで改善

2022年7月～

マウナケア管理に先住民参加

- 今までないがしろにされてきた先住民も参加する新たなマウナケア管理組織を設立するハワイ州法案が成立 (2022年7月)。先住民にも利益 (土地賃貸料・観測時間) を公平に共有する道筋が開かれる

➔ ハワイでの天文学における長年の課題の解決に踏み出す

2021年11月

Astro2020での最高評価

- 米国Astro2020 (日本のマスタープランに相当) において、地上望遠鏡計画として、TMTとGMTを合わせたUS-ELT (米国超大型望遠鏡) プログラムが最優先計画として位置づけられた

2022年7月～

NSFの予算化プロセス開始

- ハワイでの環境影響評価、国家歴史遺産保存法のプロセス (2022年7月～)
- TMT計画の基本設計審査(PDR) (2022年11-12月)

ハワイ
現地建設
再開

連邦政府
予算化

マウナケアでの建設に向けた進捗 地元対策の抜本的改革

TMT国際天文台 (TIO) が米国本土から指揮していた地元対策の立て直し

- (1) TMTマネージャー (Liu、白田) がハワイ島へ異動して指揮
- (2) TIOのハワイ対策チームを一新 (国立天文台ハワイ勤務の嘉数特任専門員がTIOチームに加入)
- 地元住民 (先住民含む) 300人以上との傾聴と敬意に基づく直接対話
- すばる望遠鏡での人脈と経験を活かし、地元住民のニーズに沿った教育・職業訓練プログラムを展開



ハワイ王国時代から続くカメハメハ騎士団とLiu (TIOプロマネ(一番左))と白田TMTプロジェクト長(右から2人目)の対話

1. 先住民が多い学区での教育支援

HAWAII PUBLIC SCHOOLS
Hawaii District

ハマクア青少年センター

ヒロ中学校

カウ高校・パハラ小学校

● Elementary School
▲ Elementary & Intermediate School
▲ Intermediate/Middle School
▲ Intermediate & High School
■ High School
■ Elementary/Intermediate & High School
★ Special School

2. コミュニティカレッジとの提携 (奨学金と職業訓練)



3. 先住民系高校生の交換留学 ハワイ郡とTMTパートナー国 (日本は沖縄など) の提携



TMT = 「顔の見えない、よそ者のプロジェクト」
から地域の一員へ。教育を軸とした協力体制の構築

マウナケアの既存望遠鏡の削減

先住民をはじめとする地元住民の意見が十分に反映されることなく、望遠鏡が建設されてきたことに対して懸念や不満が一部住民の間であり、また老朽化した望遠鏡の撤去は長年の課題でもあったことから、マウナケアの望遠鏡の削減に向け、撤去作業が具体化された。

- カリフォルニア工科大学のサブミリ波望遠鏡(CSO)の撤去作業がハワイ州によって承認された。2022年6月より準備を開始し、年内に撤去完了の予定。
- ハワイ大学ヒロ校 (UHH)の教育用望遠鏡 (ホクケア) についても撤去に向けた準備が進められている。



Caltech Submillimeter Observatory (CSO) : カリフォルニア工科大学が1987年から運用してきた口径10.4m電波望遠鏡。2015年に運用終了。

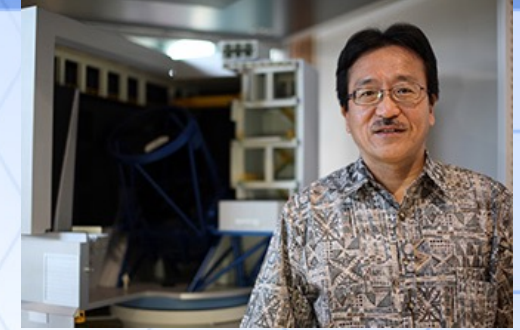


マウナケア山頂域の望遠鏡群

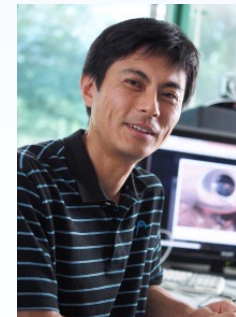
国内の活動 (1/3)

TMT推進体制の変更および強化

- メンバー代表者：川合真紀自然科学研究機構長
- 評議員：吉田道利副台長（井口聖前副台長の後任）



- 新任教授：青木和光。副プロジェクト長
- 新任准教授（10/1着任予定）：伊王野大介。



- プロジェクト長補佐、プロジェクトサイエンティスト、科学運用、総務など
- 特任教授：倉崎高明。プロジェクトコントローラー

- 先端技術センター講師：尾崎忍夫。日本のWFOSをリード。



- 先端技術センター准教授：大屋真。TMTプロジェクト併任として主鏡担当継続。

国内の活動 (2/3)

国内での開発の進捗

- ハワイでの現地工事が進められない事態を受け、日本国内およびTMT全体で、必須の活動に絞り経費支出を最小化しているが、望遠鏡の製造前審査準備やサブシステム設計・インターフェース検討、主鏡の量産段階の技術リスク低減のための開発を継続している。
- 観測装置 IRISは詳細設計段階の活動を継続し、プロトタイプを用いた試験・開発や詳細設計審査の課題解決を進めている。
- 観測装置 WFOSは基本設計段階の活動を開始。スリットマスク交換機構、大型硝材検討、面分光拡張機能などの設計・検討を継続。
- 観測装置 MODHISはプロジェクトマネージャー（寺田宏准教授）を中心に概念設計を継続。

国内の活動 (3/3)

国内コミュニティに向けた活動

- 2022年6月15日にコミュニティ説明会を開催し、約200名が参加
 1. 科学諮問委員会で検討されてきた「次期装置実現に向けた開発ロードマップ」報告と議論
 - ロードマップ及び戦略的基礎開発研究経費募集要項 (秋山 (東北大))
 - 宇宙膨張の測定から探るダークエネルギーの性質 (川端 (広島大))
 - 初代銀河サイエンスの視点からの検討 (小山 (国立天文台ハワイ))
 - 地球型惑星の直接撮像とバイオマーカーの検出 (成田 (東京大))
 2. TMT計画の現状
 - ハワイ州の動き・取り組み (青木)
 - ハワイ州議会でのマウナケア管理組織設立法案HB2024の可決。問題の背景、経緯、可決された法案の内容、今後の見通し・課題等
 - ハワイ現地におけるTIOおよびNAOJの取り組み (嘉数)
 - 組織体制、対話・教育支援の取り組み、NSFへの提案、地元の反応等
- US-ELTプログラムが提案されるもとのTMTの科学運用についての検討を継続した。2022年3月、国内での検討のまとめとして、整理した課題や日本の見解をTIO科学諮問委員会の科学運用検討小委員会に提出。

最後に

- 現地山頂工事が再開出来ておらず、スケジュールは大幅に遅延していますが、研究者コミュニティの声に基づき、今後の日本の天文学にとって30m級望遠鏡へのアクセスを確保することは必須との認識のもと、国立天文台は、TMT実現に向けて全力で取り組んでいます。
- コミュニティの皆さんには、TMTを用いた科学研究の検討などを継続して欲しい。特に光赤外線天文学だけでなく、広い分野の研究者との科学研究の発展のための検討が必要です。
- 皆様のご理解・ご協力をお願いします。